

光纤角位移传感器的设计与应用

陈安健

(厦门大学 机电工程系, 福建 厦门 361005)

摘要: 利用分叉光纤束和特殊设计的金属温度自补偿旋转杆件作为传感器的核心元件。当受力产生扭转矩, 驱使杆件敏感变形, 反射镜系统端面与光纤端面之间产生扭转角位移, 光通量变化。经后续信号电路系统的技术处理, 即可获得角位移的线性输出、显示。

关键词: 分叉光纤束; 旋转杆件; 光通量; 角位移传感器

中图分类号: TN253; TP212

文献标识码: A

文章编号: 1000-9787(2000)05-0019-03

Design and application on an optical fiber angular displacement sensor

CHEN An-jian

(Dept. of Mechan—Electricity Engin., Xiamen University, Xiamen 361005 China)

Abstract The key part of sensor made of forking fiber beam and metal revolving rod with temperature self-compensation is specially desinged. When force is applied, torsion accured, making the rod to be deformed. An angular displacement takes place between the end face of reflector system and that of optic fiber. The light flux also changes. Through the signal handling of affer end circuit system, the linear output and display of angular displacement can be obtained.

Key words: forking fiber beam; revolving rod; light flux; angular displacement sensor

0 引言

力学中受力产生扭转的微小角位移参数的变化, 传统的方法是难以测知的。诸如轴类零件, 受到力的作用后引起扭转轴变形产生扭转角位移。测试这类微小角位移时, 不希望测试元件对这类轴件产生附加扭转力矩, 因此一种灵敏度高, 非接触式测量角位移传感器的开发势在必行。

利用分叉型光纤束设计了光纤角位移传感器。这种角位移传感器就是利用光纤与光学系统相对耦合及电路信号技术处理, 获得测试的线性输出。因此光纤角位移传感器特别适合扭转轴件的测量, 检测速度快, 精度高。

1 传感器的工作原理及结构

光纤角位移传感器的结构设计示意如图 1 所示。

角位移传感器是利用发光管作光源, 发出的光束经由分叉光纤束的发送光纤传输进入测量反射镜系统端面, 反射镜将相对转动的调制光传输进入光敏元件。传感器受到轻微扭转(受力 p 及扭转矩 M) 时, 系统立刻感应, 使得反射镜端面与分叉光纤束测量端面相对转动耦合并以光功率损失状态表征。传感器沿轴装有敏感旋转杆, 该杆通过轴承与金属封装盒间可作相对转动。当测量绝对角位移时, 将金属

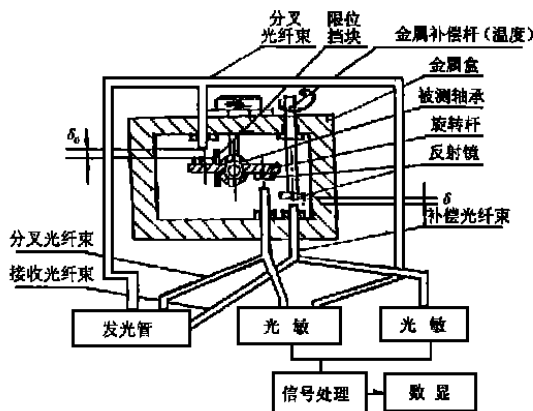


图 1 光纤角位移传感器结构示意图

Fig. 1 The structure of optical fiber for angular displacement sensor 盒系统固定, 测量相对角位移时将金属盒与旋转杆件系统分别固定在轴上的两个横截面上。三片镀铝反射镜(反射率 $R = 97\%$), 分别安装在感应旋转杆件相对应的上下两端, 而在其相对应处安装两根分叉光纤束。为了提高测量灵敏度和测量精度, 设计采用两根光纤束并联获得。当被测轴有一微小的角转动时, 旋转杆件^[1] 就与金属盒间有一相对角位移^[2] θ_0 。由光纤束反映到敏感旋转杆件的末端, 这时杆端上的反射镜端面与光纤测量端面间产生扭矩转动, 在旋转空间完成光耦合, 耦合效率是以光功率损失而改变反射光通量, 并将这一光量通过光纤束传

输入光敏元件。光敏元件将这一微小的光量由 A/D 转换^[3] 和后续电路系统处理后输出电信号、数字显示。

2 理论计算及精度分析

为精确测试,减小测试误差和环境冷热流干扰,在传感器结构中的特殊位置上设计一补偿金属杆件,在相对应处设置分叉光纤束补偿信号的传输损耗。当环境温度波动时,其补偿杆件长度 L 将随温度变化,这样它的端面与补偿光纤端面间距离 ϕ_0 将改变,这一距离的改变是通过补偿分叉光纤束中的接收光纤端光通量的改变来体现的,光敏元件即将

$$I_1 = \frac{S^2}{\sqrt{1+\beta^2}} (\phi_0 + L\beta^2) \int_{D_0} \frac{(\phi_0 + L\beta + y\beta)^2 dx dy}{[x^2 + (1+\beta^2)y^2 + 2\beta(\phi_0 + L\beta)y + (\phi_0 + L\beta)^2]^4},$$

$$I_2 = S(\phi_0 + L\beta) \int_{D_0} \frac{(\phi_0 + L\beta + y\beta)^2 dx dy}{[x^2 + (1+\beta^2)y^2 + 2\beta(\phi_0 + L\beta)y + (\phi_0 + L\beta)^2]^4}.$$

因为考虑了反射镜与光纤束的相对旋转角 β 很小,可近似认为 $\sin\beta \approx \beta$, $\cos\beta \approx 1$, 同时 β 角的平方就更小。即 $\beta^2 = 0$, 所以有

$$I_1 = S^2 \phi_0 \int_{D_0} \frac{[2\phi_0\beta(L+y) + \phi_0^2] dx dy}{[x^2 + y^2 + 2\phi_0\beta(L+y) + \phi_0^2]^4},$$

$$I_2 = S(\phi_0 + L\beta) \int_{D_0} \frac{[2\phi_0\beta(L+y) + \phi_0^2] dx dy}{[x^2 + y^2 + 2\phi_0\beta(L+y) + \phi_0^2]^4}.$$

$$x^2 + y^2 = (\phi_0 + L\beta)^2 \cdot \frac{\sin^2 2\theta}{(\cos 2\theta + 1 - \beta^2)^2}.$$

$$\text{令 } x^2 + y^2 = D_0, L + y = K, \text{ 同时 } Z = 2\phi_0\beta K + \phi_0^2$$

则

$$I_1 = S^2 \phi_0 \int_{D_0} \frac{Z dx dy}{(Z + D_0)^4},$$

$$I_2 = S(\phi_0 + L\beta) \int_{D_0} \frac{Z dx dy}{(Z + D_0)^4}.$$

$$\text{则 } R = \frac{I_1}{I_2} = \frac{S\phi_0}{\phi_0 + L\beta},$$

其中 S 为单根光纤端面截面积,即 $S = \pi a^2/4$; ϕ_0 为反射镜端面与光纤测量端面间的初始距离; L 为敏感旋转杆件长度。

以上诸式说明了在 D_0 积分区域即是微小角位移 ϕ_0 上的积分,这样小的角位移量还是能被传感器所感知,经后续电路信号系统放大显示,精度是相当高的。

经计算机数值积分,其 R 与 β 关系曲线如图 2 所示。

分叉光纤束中执行接收的光纤束的光通量以 $\phi = 4D\epsilon(1 - \epsilon)\phi_0 \cdot Q/a$ 表征,

此光信号变为电信号与测量主信号一起进入信号电路处理系统,由此消除了温度自增益,得到了温度自行补偿目的。

金属杆件用以温度补偿。设计选用 H62 铜材,其模量温度特性为 $\gamma = -3.0 \times 10^{-4}$, 线胀系数为 $\alpha = 4 \times 10^{-6}$ 。这种材料对温度的变化感知能力很强,因此要求材料的内磨擦力要小,钢度要大,灵敏度要高以保证传感器内部系统的相对扭转有良好的运动精度。其灵敏度为 $S = x/F = \text{常数(线性)}$ 。

理论分析计算得到反射光强及旋转角 β 在区域 D_0 上的反射率 $R = I_1/I_2$,

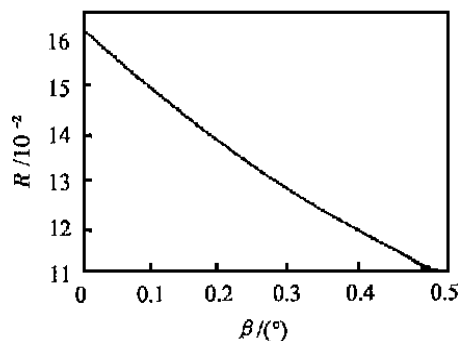


图 2 $R \sim \beta$ 理论曲线图

Fig 2 $R \sim \beta$ theoretical curve

式中 ϕ_0 为发送光纤束中的单根光纤传输光通量; D 为光纤束测量端面积; a 为单根光纤直径; Q 为光纤所接受的最大入射角; ϵ 为 $\epsilon = H_1/H_2$, $1 - \epsilon = H_2/H$; H_1 为发送光纤束根数; H_2 为接收光纤束根数; H 为分叉光纤束总根数。

可见, $H = H_1 + H_2$, 由此设计选用同样特征的光纤,且用同一发光管发光,这对于简化系统结构是有利的,这时 D 、 ϵ 、 ϕ_0 、 a 均为常量,则光通量 ϕ 与反射率 R 成线性关系。因此, ϕ 与 β 之间的关系曲线在理论上是相似于图 2 所示。

光纤角位移传感器输入—输出曲线呈线性,图 3 所示与理论曲线是相同的。

这种传感器不仅可测轴的角位移,轴的扭转角,而且凡是可转化为微小角位移的一些物理量,用它来传感检测,灵敏度高,分辨率大。理论证明传感器二次仪表数显装置为 $3 \frac{1}{2}$ 位,当轴有 1° 的角位移时,表头就有 40 个字的稳定输出,一个字的稳定输出代

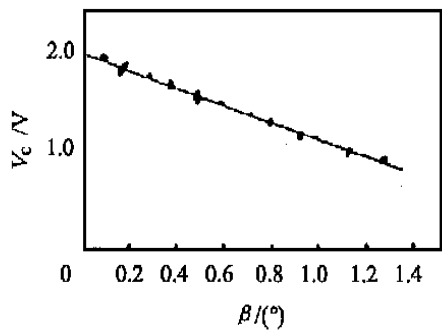


图 3 传感器输入——输出曲线图

Fig. 3 Input and output curve of sensor

表其分辨率约为 0.03° 的角位移精度。

从式 $\Delta\phi = [0.5643D\epsilon(1-\epsilon)\phi_0/n^2\sqrt{a\sin^2Q}] \cdot 3\sqrt{\delta\Delta\hat{q}}$ 提高传感器灵敏度的措施显然有:

- (1) 增加 D 减少 a , 即增大光纤束截面积, 减小单根光纤芯径;
- (2) 使 $\epsilon(1-\epsilon)$ 最大, 显然 $\epsilon = 1/2$ 时, 即分叉光纤束的发送和接收光纤束应有相同根数;
- (3) $N_A = \sin^2 Q$ 要大, 但灵敏度受 ϕ_0 牵制, 权

衡后应增大 N_A , 即应选用数值孔径 N_A 大的光纤。

3 结束语

为扩大传感器测量范围, 理论计算和分析表明, 旋转杆件长度 L 为 37.5 mm , 光纤束轴径 D 为 4.25 mm 时, 测量范围为 $0 \sim 6^\circ 17'$ 。因此是最佳设计参数。传感器用于非接触测量, 对于高密度、高精度尺寸、精密微小角位移量的传感测量, 灵敏度高, 性能可靠, 因此对被测对象基本上无结构加强效应。

参考文献

[1] 李威宣, 陶宝棋. 能消除力偏心影响的光纤测力传感器[J]. 南京航空学院学报, 1989, 21(4): 216—218.
[2] 陶宝棋, 李威宣. 斜角光纤耦合原理分析及应用[J]. 仪器仪表学报, 1990, 11(3): 328—332.
[3] 张彤. 光电接收器件及其应用[M]. 北京: 高等教育出版社, 1991. 101—104.

作者简介:

陈安健(1950—), 男, 福建连江县人。工程师, 研究生学位课程班。长期从事光学、激光仪器的传感检测的设计、研究与教学工作, 并发表相关论文多篇。

(上接第 18 页)

表 1 测试结果
Tab. 1 Result of test

压力 (MPa)	0	0.02	0.04	0.06	0.08	0.10
输出 值 (mV)	12.56	22.74	33.45	43.76	53.54	64.40
	12.99	22.95	33.66	44.12	53.00	64.50
	12.92	22.54	33.89	44.22	53.88	64.68
	12.65	23.02	33.67	43.88	54.07	64.31
	12.74	22.55	33.82	43.97	53.98	64.45
	12.67	22.69	33.78	43.96	53.81	64.55

$U_{FS} = 51.75$, 非线性 $A_L = 6.134 \times 10^{-3}$,
重复性 $A_R = 9.886 \times 10^{-3}$, 迟滞 $A_H = 5.344 \times 10^{-3}$,
精度 $A_A = 1.369 \times 10^{-3}$

压力阵列: 0.1 MPa 下, 传感器平均精度 1.76% , 其中最高精度为 0.89% , 最低精度为 3.31% 。

从以上数据可以看出, 该压力传感器阵列的指标已经具备了一定的精度等性能指标。

4 结 论

在前期进行的研究中, 存在下列问题:

- (1) 由于集成的设计还不够完美, 阵列式压力传感器精度还较低;
- (2) 工艺上的限制, 尤其是各向异性腐蚀与芯片

上力敏电阻条、外围电路部分保护的矛盾, 样品的制备困难, 尤其芯片静电封接工艺, 封接的成功率较低, 故成品率较低;

(3) 由于芯片的尺寸相对较大, 受材料的限制, 缺陷较多, 造成阵列中个别的压力元件灵敏度偏低, 影响了样品中压力阵列的一致性。

这些问题需要在以后加以解决。但相信经过大量的结构、工艺、电路的改进, 如采用更优良的工艺线、应用容错处理电路、使用软件补偿技术等, 继续进行深入试验, 传感器的性能指标会有进一步的提高。

参考文献

[1] 袁希光. 传感器技术手册[M]. 北京: 国防工业出版社, 1986. 440—444.
[2] Susumu sugiyama, Ken Kawahata. Tactile image detection using a 1k—element silicon pressure sensor array[J]. Sensors and Actuators A, 1990, 12—23: 97—400.
[3] 陈贵灿, 邵志标, 程军, 等. CMOS 集成电路设计[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1999. 44—45.

作者简介:

王长虹(1969—), 男, 黑龙江省哈尔滨市人。1992年毕业于吉林大学电子科学系, 现在信息产业部电子第 49 研究所从事传感器、变送器及自控仪表的研制和生产, 发表论文 6 篇。